

汎用並列地震応答解析手法の開発と応用

堀 宗朗 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

澤田 昌孝*1, 園部 秀明*2, 山崎 崇寛*3, 羽場 一基*2, 堀 宗朗*4

*1 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部, *2 大成建設(株)原子力本部, *3(株)四国総合研究所 土木技術部, *4 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

本研究は、開発中の汎用並列地震応答解析手法をチューンアップするとともに、地震応答解析に必要な要素モデルの高度化を図り、実務利用を進める研究者とともに、汎用並列有限要素法の有効性を検証し、計算結果の精度評価やモデルの妥当性確認を行った。汎用並列有限要素法は GeoFEM の発展形、e-FrontISTR である。具体的な対象は、2014 年長野県北部と実大規模のプラント建屋である。前者に対しては、震源断層全域を含む水平方向 40km × 40km、深さ 20km 程度の解析領域に対して約 2.3 億自由度の FEM モデルを構築し、2048CPU コアの並列計算を行った。地表及び地層構造をモデル化することで、従来の食い違いの弾性論では評価できない複雑な変位を評価できることが分かった。後者に対しては、鉄筋コンクリート建屋の非線形解析モデルを利用した。非線形解析に必要な解析パラメータを適切に設定した上で、通常の数値解析では不可能な極めて大きな加速度の地震動を入力し、損傷の原因となるコンクリートの非線形化の程度を評価した。

キーワード：汎用並列有限要素法、非線形解析、地震動伝播解析、構造物地震応答解析

1. はじめに

地震応答解析は、実験が不可能な、地殻・地盤の地震波動の伝播・増幅過程や、実構造物の非線形挙動を評価する手法とされている。この評価にはより高い時空間分解能と精度が常に求められる。この要求に答えるため、著者のグループは、地震応答解析に特化した汎用並列有限要素法、e-FrontISTR の研究開発を進めている。現在、プロトタイプの開発段階は終了し、技術者が利用する実用版の開発段階に達している。

近い将来、e-FrontISTR は相応の大型計算機上で実務利用されることが想定される。この準備として、本研究では、ES4 上で e-FrontISTR を使う数値実験を行った。実務利用が目標となるため、現実的な解析モデルを使った数値解析の実行可能性を検証することが主眼となる。

具体的な数値実験は、2014 年長野県北部地震と実大規模のプラント建屋である。2014 年長野県北部地震は、地表地震断層を発生させた地震であり、地震動と断層変位の重畳を評価することを念頭においている。プラント建屋は実構造物を模擬したもので、通常の数値解析では不可能な、極めて大きな加速度の入力地震動に対する非線形応答を評価する。

2. 2014 年長野県北部地震

2.1 e-FrontISTR の利用

大規模な内陸地震において発生する地表断層変位は、近傍の構造物に大きな影響を与える可能性があるため、重要構造物に対して、その安全性評価の必要性が指摘されている。断層変位の評価手法として連続体力学に基づく数値解析がある。

近年、断層変位の評価に加え、地震動との重畳に関する

検討の必要性も指摘されている。大規模計算が必要となるものの、連続体力学に基づく数値解析は、この重畳にも有効である。このため、e-FrontISTR を使って広域の地震動を評価し、それを浅部に境界条件として入力し、二段階で地震動と断層変位を評価する方法を検討している(図2-1 参照)。2014 年長野県北部地震を対象に、本年度は、広域の動的 FEM 解析結果を示す。

2.2 解析条件

2014 年長野県北部地震では、震源域南側 9km に渡って地表地震断層が発生し、地表断層北端付近では副断層が観測された。この点を考慮し、解析領域は、図 2-2 に示す通り、地震断層全域を含む水平方向 40 km × 40 km、深さ 20 km 程度とした。なお、参考のため、図 2-1 には断層変位解析で対象とした解析領域 (5 km × 5 km) を示している。多段階の断層変位評価を行う場合には、広域の動的 FEM 解析結果 (節点力および節点速度) を詳細モデル境界に入力する。

本検討では、断層すべりをダブルカップル力で表現し、要素節点に外力として与える。主断層面のすべり分布は

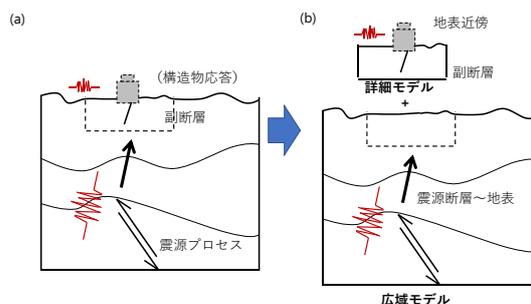


図 2-1. 多段階 FEM の概要

国土地理院による逆解析結果(図2-3) [3]を用い、点震源を100m×100m毎に設定した。ただし、すべりの時間依存関数は評価されていないため、引間らの逆解析結果[4]を参考に設定した。解析は0.01秒刻みで20秒まで実施した。

解析モデルの地層形状および物性値は、せん断弾性波速度 $V_s < 3.4$ km/s は J-SHIS 深部地盤データ[5]、 $V_s > 3.4$ km/s は全国1次地下構造モデル(暫定版)を用いて設定し、減衰は地層ごとに Q 値に応じたレイリー減衰により設定した。また、側面及び底面には粘性境界を設定した。

2.3. 解析モデル

解析モデルは、オクトツリー法により四面体1次要素でメッシュ分割し、その後、四面体2次要素に修正して作成した。基本的に、オクトツリー法では地表及び地層境界が階段状に表現されるが、特に地表の階段形状は地表付近の応力に大きく影響する可能性がある。そのため、本検討では、メッシュ分割に使用する地盤モデル全体を直方体に変換した上でメッシュ分割を行い、その後逆変換を行うことで、地表面を滑らかに表現した。この時、地層境界は階段状になることに注意する必要がある。

本検討では対象周波数を2.5 Hzとし、最小節点間距離を32.15 mとして解析メッシュを作成した。図2-4に作成した解析モデルを示す。ここで、y軸正方向が北方向に対応する。また、参考のため、地震断層の想定位置を白点線で示している。解析モデルは7層の地層により構成され、総自由度数が228,465,240である。地表面の大部分は $V_s =$

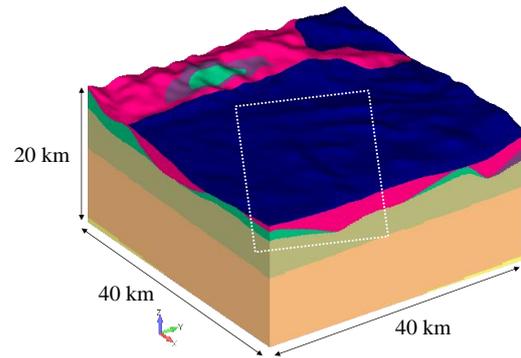


図2-4. 解析モデル

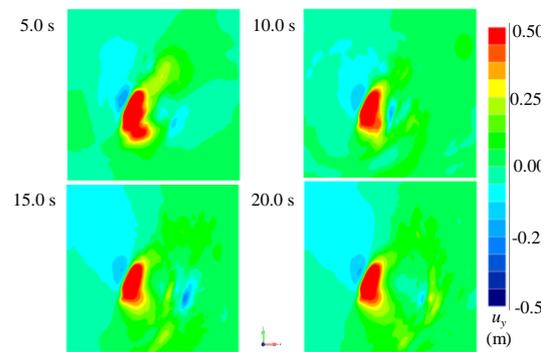


図2-5. 地表面のy方向変位 u_y の変化

1.0 km/s の岩盤 (青色部分) で覆われるが、山間部では $V_s > 2.0$ km/s の岩盤が表れる。

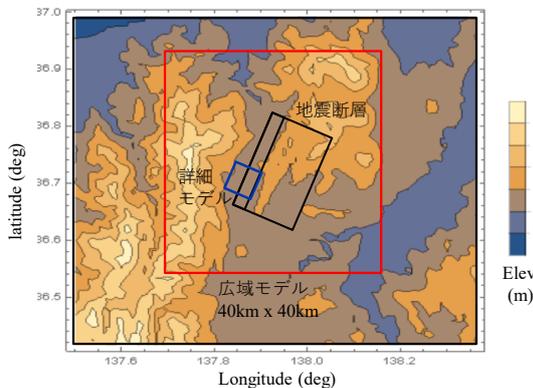


図2-2. 評価対象領域 (2014年長野県北部の地震)

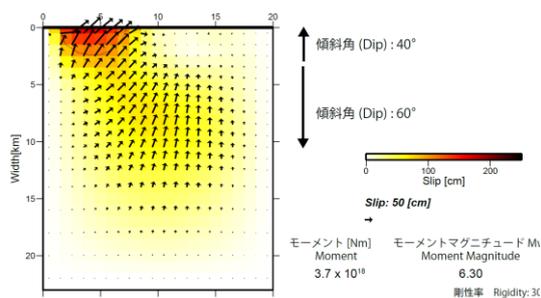


図2-3. 国土地理院の逆解析結果[3]

2.4. 評価結果

本解析は、2048CPU コアの並列計算を実施し、計算時間は約7.1時間であった。図2-5に地表面のy方向変位コンター図を示す。地表断層変位が発生した地震断層の南側(-y側)で大きな永久変位が発生している。それとは別に、上盤側(+x側)で断層から離れた場所に変位が大きい領域が確認できる。分析の結果、5.0秒のそれは深部のアスペリティからの影響である。一方、10.0秒以降では、断層浅部のすべりにより、断層面に垂直な方向に変位が伝播し、それが散逸していくためであることが分かった。

3. 実大規模プラント建屋

3.1 e-FrontISTR の非線形解析概要

図3.1に、e-FrontISTR に実装されている、2種類の非線形材料による非線形解析の概要を示す。鋼材等、一般的な非線形材料は接線剛性が負にならないため、反復回数を増やすと残差ノルムは0に収束する。一方、コンクリートは圧縮・引張強度を超えると、接線剛性が負になり、反復回数を増やしても必ずしも残差ノルムが0に収束するとは限らない。適切な最大反復回数と残差ノルムを設定することが必要である。この値は時間刻みにも依存する。

ニュートン法のアルゴリズムも残差ノルムの収束に寄与する。図3.2に初期剛性と接線剛性を使う二つのアルゴ

リズムを示す。前者は計算安定性が高いが、反復回数が多い。コンクリート構成則に加え、建屋の浮き上がり起因する非線形挙動も残差ノルムに影響するため、最大反復回数と残差ノルム閾値の設定は容易ではない。後者は反復回数を少なくすることができるが、計算安定性は低い。既往研究を基に、接線剛性を使うアルゴリズムでニュートン法の計算安定性が増すよう、e-FrontISTR を修正している[1,2]。

3.2 非線形解析の設定

従来、用いられてきた入力地震動を1.5倍し、表3.1に示す4ケースの時間刻み、最大反復回数、残差ノルム閾値を設定した数値解析を行った。実務では必須となる応答スペクトルや応力分布に関しては、全4ケースにおいて同様の結果が得られている。

図3.3に4ケースの残差ノルムと最大反復回数の時刻歴を示す。ケース1は、60秒を過ぎた箇所でも異常終了している。図に示すように、残差ノルムが発散したためである。ケース2は最大反復回数を減らしたが、残差ノルムは閾値を超えることが多く、この意味で計算は安定しない。ケース3は時間刻みを小さくしたため、ケース2に比べて残差ノルムは小さくなっている。しかし、反復回数は多い。ケース4は、接線剛性を使う改良されたアルゴリズムを使い、最大反復回数を小さく設定した。ほぼ全時刻で残差ノルムが閾値以下となっている。時間刻みは0.0005秒で、他の3ケースよりも大きい。ケース4の設定が正確かつ高速の非線形解析となることがわかる。

3.3 大きな加速度の入力地震動の応答

前章で検討された非線形解析の設定を利用し、従来、用

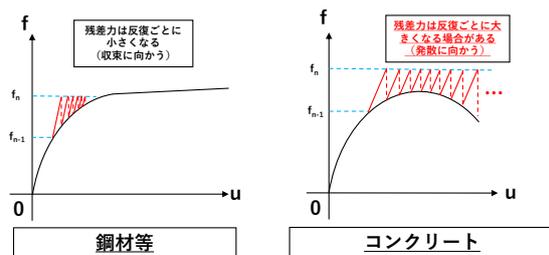


図3-1. e-FrontISTRの非線形解析

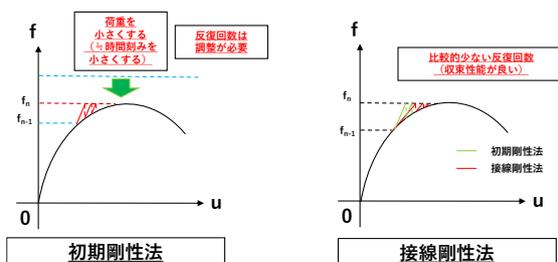


図3-2 e-FrontISTRに実装されているニュートン法の二つのアルゴリズム

表3-1. 解析検討ケース

	入力地震動倍率	非線形方程式解法	時間刻み sec/step	最大反復回数	残差ノルム比閾値
1	1.5	初期剛性法	2.5×10^{-4}	50回	1.0×10^{-9}
2	1.5	初期剛性法	2.5×10^{-4}	10回	1.0×10^{-9}
3	1.5	初期剛性法	1.0×10^{-4}	20回	1.0×10^{-9}
4	1.5	接線剛性法 ^[1]	5.0×10^{-4}	10回	1.0×10^{-9}

いられてきた入力地震動を1.0倍、1.5倍、2.0倍し、e-FrontISTRを用いた数値解析を実施した。3つの地震動に対し、残差ノルムは概ね閾値以下であり、最大反復回数に達した場合でも残差ノルムが閾値を大きく超えることはなかった。初期剛性を使うアルゴリズムと比べて、接線剛性を使うアルゴリズムは時間刻みを大きく設定することができるので、計算時間は短縮された。

図3-4と図3-5に2.0倍の入力地震動に対する、建屋の鉄筋の引張応力とコンクリートの圧縮主応力の分布を示す。このように大きな加速度を持つ地震動を入力した場合でも、鉄筋・コンクリートとともに局所的な損傷が発生しないことが確認された。なお、鉄筋の引張応力の最大値は、降伏応力の約7割程度、コンクリートの圧縮主応力の最大値は圧縮強度の約4割程度である。鉄筋は線形であるが、コンクリートは、剛性が1割程度低下する非線形化を示している。

4. まとめ

本研究は、ES4上でe-FrontISTRを利用し、2014年長野県北部地震と実大規模のプラント建屋の地震応答解析を実施した。前者に対しては、e-FrontISTRを使った広域の地震動伝播解析が可能であること、後者に対しては、通常は不可能な大入力地震動に対する非線形解析が可能であることが確認された。

文献

- [1] 澤田昌孝, 羽場一基, 堀宗朗, “地表地震断層を伴う実地震を対象とした高性能計算による地表断層変位評価”, 土木学会論文集 A2, vol. 74, no. 2, pp. I_627-I_638, 2018.
- [2] 澤田昌孝, 羽場一基, 藤田航平, 市村強, 堀宗朗, “広域・詳細2段階のFEMによる断層変位・地震動評価のための数値解析”, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会予稿集, CS11-22, 2021.
- [3] 国土地理院, 「だいち2号」合成開口レーダーによる地殻変動分布図と滑り分布モデル(暫定), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/14dec_nagano/p.29.htm
- [4] 引間和人, 中村亮一, 植竹富一, “2014年長野県北部の地震(Mj6.7)の震源過程～震源近傍の広帯域

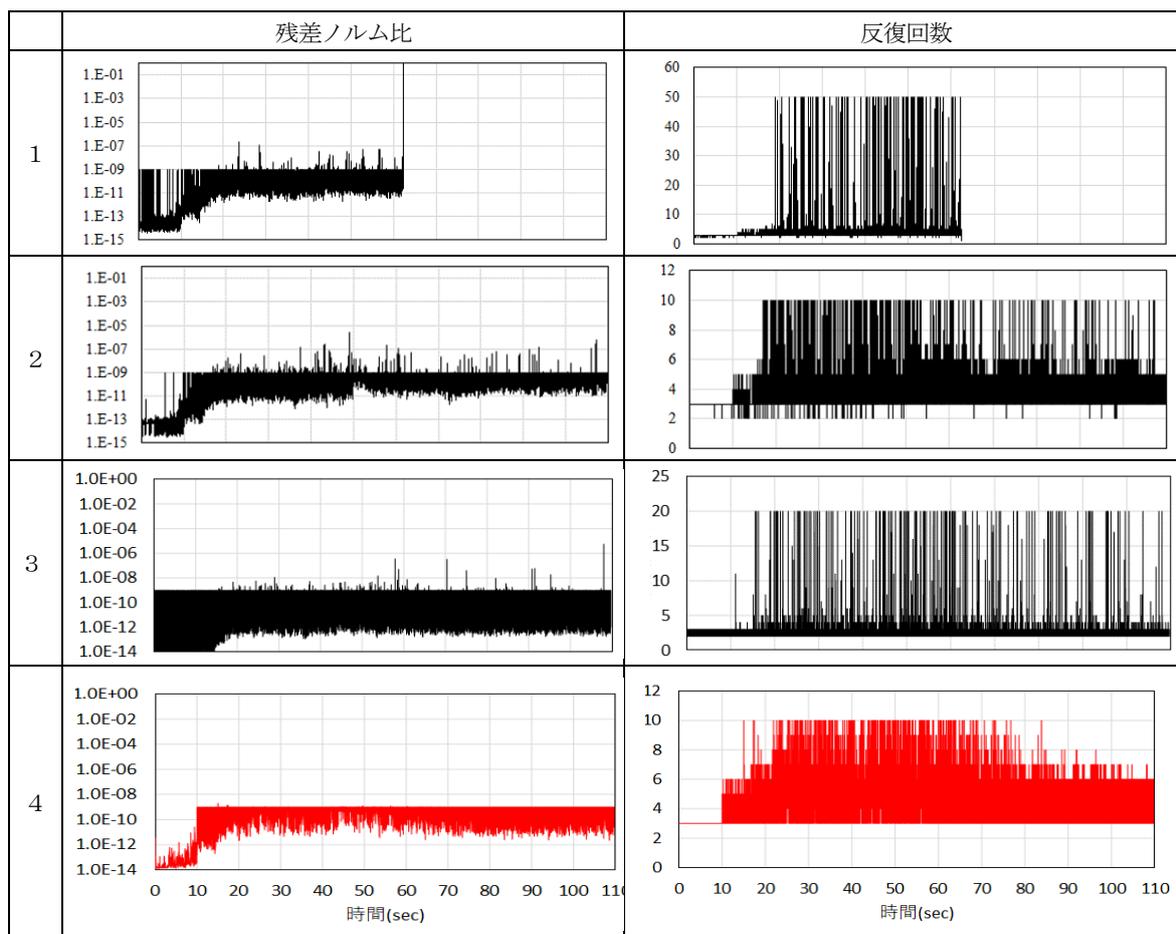


図 3-2 残差ノルムと反復回数の推移

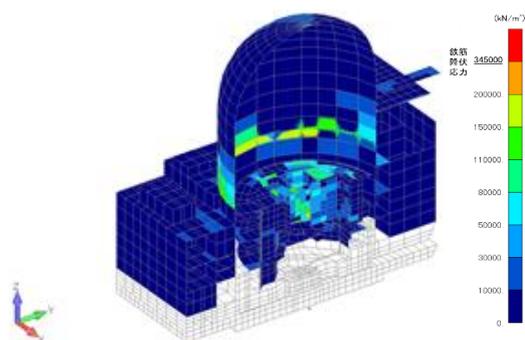


図 3-3. 鉄筋の引張応力
最大値 : 236000 kN/m

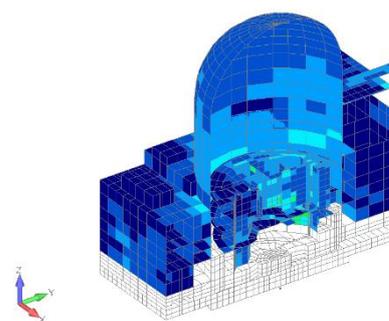


図 3-4. コンクリートの圧縮応力
最小値 : -19300 kN/m²

- 地震波形を考慮した解析～”，日本地震学会講演予稿集 2015 年度秋季大会，S15-14，2015.
- [5] 防災科学技術研究所，J-SHIS 地震ハザードステーション，<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- [6] 堀田渉，鈴木俊一，堀宗朗，“3次元テンソル形式コンクリート構成則の2次元厚板要素への実装と検証”，地震工学論文集第40巻，I_107-I_116，2021.

- [7] 本山紘希，園部秀明，堀田渉，鈴木俊一，堀宗朗，“大規模鉄筋コンクリート構造物の詳細モデルを用いた地震応答解析手法の開発とその妥当性確認に関する基礎検討”，日本地震工学会論文集第19巻，345-355，2019.

Development and Application of GP-HPC-FEM E-FrontISTR

Project Representative

Muneo Hori Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Authors

Masataka Sawada*¹, Hideaki Sonobe*², Takahiro Yamasaki*³,
Kazumoto Haba*², Muneo Hori*⁴

*¹Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, *²Nuclear Facilities Division, Taisei Corporation, *³ Civil Engineering Department, Shikoku Research Institute, Inc., *⁴Research Institute for Value-Added-Information Generation, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Tuning up the general-purpose parallel finite element method, e-FrontISTR, we carried out numerical analysis of the 2014 Northern Nagano Prefecture Earthquake and a real-scale plant building. For the former, we constructed an analysis model with about 230 million degrees of freedom for a domain of 40 km x 40 km and about 20 km in depth. Complex displacements that could not be evaluated by the conventional elastic theory of discrepancies could be evaluated. For the latter, a nonlinear analysis model of a real-scale reinforced concrete building was used. We evaluated the degree of nonlinearization of the building by inputting extremely strong ground motions, which ordinary numerical analysis cannot solve.

Keywords: General-Purpose High-Performance-Computing Finite-Element-Metho, Nonlinear analysis, Seismic Wave Propagation Analysis, Structural Seismic Response Analysis

1. Introduction

Higher spatio-temporal resolution and accuracy are always required for the seismic safety evaluation. Thus, we are conducting research and development of e-FrontISTR, a general-purpose parallel finite element method specialized for seismic response analysis.

In this study, we analyzed the 2014 Northern Nagano Prefecture Earthquake, which generated a surface earthquake fault. We also analyzed a real scale plant building. A large-scale numerical analysis was carried out for the both problems.

2. 2014 Northern Nagano Prefecture Earthquake

Recently, it has been pointed out that in addition to the evaluation of fault displacement, it is also necessary to consider the superposition of fault displacement and earthquake motion. Although large-scale computation is required, numerical analysis based on continuum mechanics is effective for this superposition.

In the 2014 Northern Nagano Prefecture Earthquake, a surface earthquake fault extended 9 km to the south of the epicenter, and a sub-fault was observed near the northern end of the surface fault. The analysis area was set to 40 km x 40 km horizontally and 20 km in depth, including the entire area of the earthquake fault. When evaluating fault displacement in multiple steps, the dynamic FEM analysis results (nodal forces and nodal velocities) for a wide area are input to the detailed model boundary.

The analysis model was created by dividing the mesh into tetrahedral first-order elements using the octree method and then modifying the mesh to tetrahedral second-order elements; see Fig. 1. Basically, the Octree method represents the ground surface and strata boundaries as a staircase, and in particular, the staircase

shape of the ground surface can significantly affect the stresses near the ground surface. Therefore, in this study, the entire ground model used for mesh partitioning was transformed into a

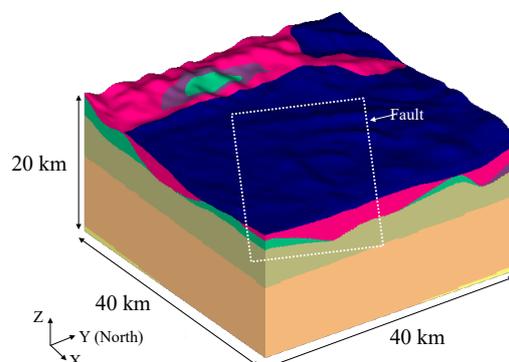


Fig. 1. Analysis model

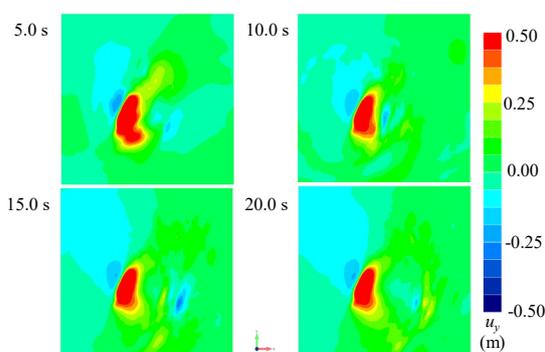


Fig. 2. Change of y-directional displacement u_y of the ground surface

rectangular shape, and then mesh partitioning was performed, followed by an inverse transformation to smoothly represent the ground surface. It should be noted that the strata boundaries are staircase-like.

The analysis was performed in parallel on 2048 CPU cores and took approximately 7.1 hours. Figure 2 shows a contour map of the ground surface displacement in the y direction. Large permanent displacement occurs on the south side (-y side) of the earthquake fault where the surface fault displacement occurred. In addition, a region of large displacement can be seen on the upper plate side (+x side), far from the fault. The analysis shows that at 5.0 arcseconds, this is due to the effect of deep asperities. On the other hand, after 10.0s, the displacement propagates in the direction perpendicular to the fault plane due to the slip in the shallow part of the fault, and the displacement dissipates.

3. Real-Scale Plant Building

The Newtonian algorithm also contributes to the convergence of the residual norm. Figure 3 shows two algorithms that use initial stiffness and tangential stiffness. The former has high computational stability but requires a large number of iterations. In addition to the concrete constitutive law, nonlinear behavior due to building uplift also affects the residual norm, so setting the maximum number of iterations and the residual norm threshold is not easy. The latter can reduce the number of iterations, but the computational stability is low. Based on previous studies, we have modified e-FrontISTR to increase the computational stability of the Newton method using tangential stiffness.

Figures 4 and 5 show the distribution of tensile stress in the steel bars and compressive principal stress in the concrete of the building for an input earthquake motion of 2.0 times. It was confirmed that local damage to both the rebar and concrete did not occur even when earthquake motion with a large acceleration was input. The maximum tensile stress of the rebar is about 70% of the yield stress, and the maximum compressive principal stress of the concrete is about 40% of the compressive strength. While the rebar is linear, the concrete shows nonlinearization with a decrease in stiffness of about 10%.

4. Concluding Remarks

In this study, we used e-FrontISTR on ES4 to analyze the

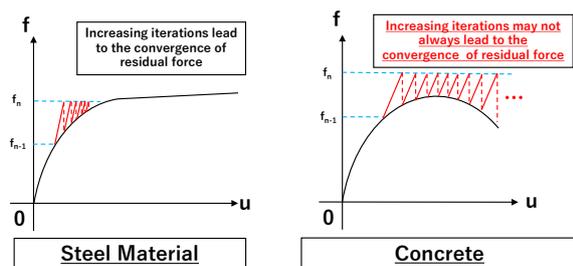


Fig. 3. Material Softening and Nonlinear Analysis

wave propagation process of the 2014 Nagano Prefecture Northern Japan Earthquake and the seismic structural response of a nuclear power plant building. For the former, it was confirmed that e-FrontISTR could be used for wide-area seismic motion propagation analysis, and for the latter, nonlinear responses induced by extremely strong ground motion, which could not be computed using other numerical analysis methods, were computed using e-FrontISTR on ES4.

References

- [1] M. Sawada, K. Haba, M. Hori, "Evaluation of surface fault displacement in a real earthquake with surface faulting by high performance computing", J. JSCE, vol.74, pp.I_627—I_638, 2018. (In Japanese)
- [2] M. Sawada, K. Haba, K. Fujita, T. Ichimura, M. Hori, "Numerical simulation for evaluation of fault displacement and seismic vibration using macro-micro 2-step FEM", Proc. of 2021 Annual Meeting of the Japan Society of Civil Engineers, CS11-22, 2021. (In Japanese)
- [3] Wataru Hotta, Shunichi Suzuki, and Munero Hori, "Implementation and Verification of 3D Tensor Form Concrete Constitutive Law to 2D Thick Plate Elements," Journal of Earthquake Engineering, Vol. 40, I_107-I_116, 2021.
- [4] K. Motoyama, H. Sonobe, W. Hotta, S. Suzuki, and M. Hori, "Basic study on development and validation of seismic response analysis method using detailed model of large-scale reinforced concrete structures," Transactions of the Japan Society of Earthquake Engineering, Vol. 19, 345-355, 2019.

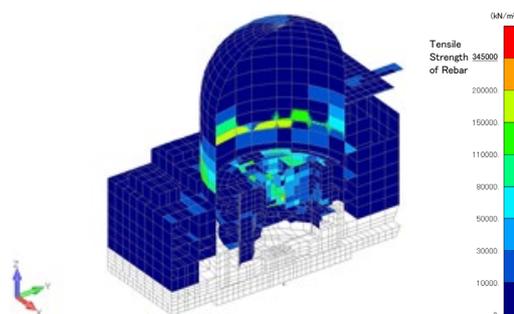


Fig. 4. Tensile stress of steel

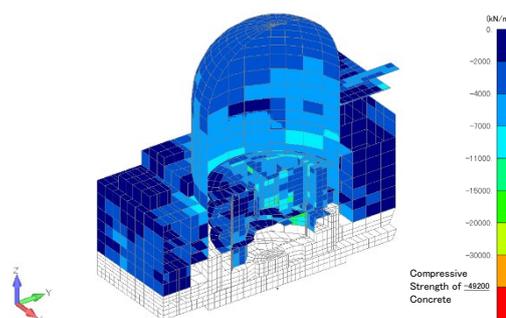


Fig. 5. Compressive stress of concrete